

## La microscopie par scansion eletroniche (SEM) voli magjic pe sience dai materiâi

ALESSANDRO BACHIORRINI\*

**Ristret.** Se la microscopie otiche tradizional e à puartât a une prime grande rivoluzion tal savê scientific, e je la microscopie par scansion eletroniche (Scanning electron microscopy – SEM) la cause prime de evoluzion simpri plui imburide e straordinarie vude tai ultins setante agns de sience dai materiâi. Te rassegne a son ricuardadis lis resons dal sucès de SEM tal disvilup de sience dai materiâi e a son ilustrâts un pôcs di esemplis che a pandin la sô fuarce tal judâ a rivâ a distrigâ i berdeis de sience.

**Peraulis clâf.** Meccaniche de fracture, morfologjie, microstrutture, microanalisi.

**Debit di paiû.** *Une dì, fevelant dal Gjornâl Furlan des Siencis cul so di-retôr scientific Romano Locci, o vevi dit che nol sarès stât mâl cirî di cunvinci i coleghis de Universitât dal Friûl a scrivi des rassegnis su aspiets particolârs dal lôr setôr scientific: par esempli dai struments o des technichis di ricercje. Dal moment, riduçant surian, lui mi veve rispuindût:*

*– Bon! Di ce scrivarâstu te rassegne dal numar ch'al ven?*

*– Dal jutori de spettroscopie infrarosse ai studis di mecanochimiche, i vevi dit jo a colp cence dâmi il timp di pensâi parsore e di rindimi cont che une rassegne compagne e varès podût interessâ plui o mancul une dozene di ricercjadôrs sparniçâts pal mont intîr.*

*– Po ben, o spieti la tô rassegne par la fin dal mès! mi veve rispuindût lui, cence molâ di riduçât surian. Ma, naturalmentri (e par fortune dal*

---

\* Za Ordenari di *Sience dai Materiâi*, Universitât dal Friûl, Udin, Italie. Vie Cuatri Fevrâr, n. 7, Tresesin (Ud).

*Gjornâl), nol veve spietât la mê rassegne e si jere dât da fâ par taponâ la buse contentantsi, cuant che mi viodeve, di stiçâmi domandantmi:*

*– E la rassegne?*

*“I debits a son di paiâ!” mi vevin insegnât i miei vecjos e, ancje se Romano nol jere plui, la rassegne o vevi di scrivile. Dome che, propit parcè che lui nol è plui, o ai pensât ben di lassâ pierdi la spettroscopie e di scrivi di microscopie eletroniche che e je stade une tecniche di scandai une vore doprade no dome di me ma ancje di Romano pai siei studis. O spero che al sedi content.*

*Mandi Romano*

**Ce ise la microscopie par scansion eletroniche (SEM)?** Gjavade la astronomie, no crôt che al sedi cjamp di ricercje scientifiche sperimentâl che nol vebi il microscopi jenfri i siei imprescj plui vlevui. Ma al covenite visâsi che no duçj i microscopis a son compagns. Un microscopi tradizionâl, ven a stâi otic, nus permet di viodi (cun passabile definizion) robis tant piçulis di scjampâ al voli dal om tant che un bateri o une alighe monocelulâr, ma par viodi (e ben) robis cetant plui piçulis (tant che un nucli cristalin intun veri o un radicâl trifenilmetanic cjapât suntune fibre di amiant) si scugne doprâ un microscopi eletronic. Chest al ven dal fat che il podê risolutîf (ven a stâi la distance minime par podê viodi ancjemò dividûts doi ponts) di une lint (o di un grup di lints sicu un microscopi) al è cetant plui grant tant plui piçule e je la lungjece d'onde de radiazion doprade par viodi.

La microscopie otiche tradizionâl, doprant la lûs dal soreli (o similâr), e je fie di un disvilup tecnologjic condurât milenis. Ma al è dome cu lis osservazions di gotis di aghe impoçade, fatis tal 1674 di Antony van Leeuwenhoeck, che si aferme tant che imprest fondamentâl pal studi sientific de nature puartant a une grande rivoluzion dal savê, soredut tai cjamps de biologjie e de medisine.

La microscopie eletroniche, impen, e poie lis sôs fondis sui studis de radioativitât di Joseph John Thomson (fin votcent-prin nûfcent) e su la *teorie des ondis materiâls* elaborade tal 1924 di Luis de Broglie, che e previodeve che ancje parteselis materiâls (par esempi eletrons) a podessin pandi proprietâts ondulatoriis e compuartâsi tant che fas di lûs. Cheste gnove microscopie, duncje, e dopre fas di eletrons acelerâts e indreçâts, tal alt vueit, di

bande di diferents cjamps magnetic variabii (lints magnetichis). Dal 1931, an di costruzion (par cure di Ernst Ruska e Max Knoll) dal prin imprest, la microscopie eletroniche si è disvilupade (e e continue a disvilupâsi) a velocitât di no crodi, puartant a un savoltament totâl des cognossincis sientifichis (massime tai cjamps de chimiche aplicade e de sience dai materiâi) e confinant la microscopie otiche tradizional aes analisis ripetitivis a piçui ingrandiments, tant che par esempi i esams clinics.

Se o ricuardin che la lungjece d'onde medie de lûs dal soreli e je di 5000 Å e chê di un fas di eletrons acelerâts a 100 kvolt e je di 0,05 Å, che al vûl di che il podê risolutîf di un microscopi electronic al pues jessi ancje 100.000 voltis plui grant di chel di un microscopi otic, si capîs ben il parcè dal sucès, in ducj i cjamps de ricercje sperimentâl, de microscopie eletroniche in dam di chê tradizional.

Ma, in realtât, la cause dal sucès de microscopie eletroniche no je dome chê dal so podê risolutîf enormi. Il fat al è che cu la microscopie otiche, par solit, si puedin gjavâ fûr nome informazions morfologjichis dal campion esaminât (e ancje chês a son limitadis de profonditât de zone di fûc che si scurte une vore cul cressi dai ingrandiments); invezit cu la microscopie a scansion eletroniche (di no confondi cu la microscopie eletroniche in transmission!) la profonditât de zone di fûc e je simpri tant grande di no impaçâ e, in plui, si puedin vê un grum di altris informazions diversis. Cun di fat, cuant che un fas di eletrons al bat su la superficie di un campion, nome une part dai eletrons (in proporzionalitât direte cu la lôr energjie e invierse cu la densitât dal campion e cul spessôr di traversâ) a rivin a traversâlu cence interagjî. Pal rest si produsin efîets di interazion divers e complès che, in struc, a puartin a la diliberazion di: eletrons Auger, eletrons secundaris, eletrons retroriflès, eletrons di conduzion, fotons-X, fotons di fluoressence di rais-X, fotons di termoluminescence e fotons di catodiluminescence (Figure 1).

Par ogni cualitât di eletrons o

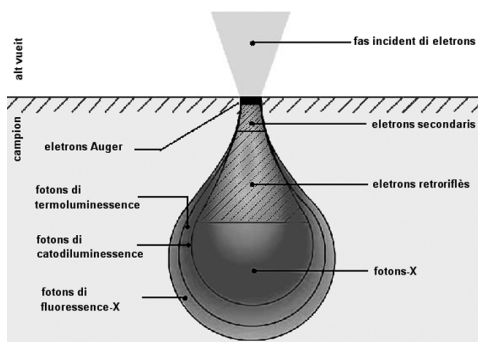


Figure 1. Scheme de interazion jenfri il fas incident di eletrons e il campion scrutinât intun microscopi a scansion eletroniche.

fotons che a saltin fûr dal campion al esist un o plui rivelatôrs specifics che a permetin di viodiju e di misurâju gjavant fûr une (ma dispès plui di une) informazion specifiche.

Covente notâ che profunditât e volum de zone di interazion (in zerc: *piruç*) a dipindin de cualitât dal segnâl scrutinât (Figure 1) ma ancje de densitât dal campion e de energjie dai eletrons dal fas incident, si ben che la grandece dal *piruç* si pues mudâle justant la tension di accelerazion dai eletrons e la viertidure di fûc dal fas incident.

I eletrons secundaris a son scrutinâts soledut par viodi la morfologjie de superficie dal campion. Dai eletrons Auger si gjavin fûr informazions su la composizion chimiche e su la nature dai leams chimics de superficie dal campion. I eletrons retroriflès a dan informazions cubiadis di morfologjie e di contrast chimic. Dai eletrons di conduzion si gjavin fûr, par esempi, informazions di resistivitât eletriche. I fotons-X e i fotons di fluoressence prodots di rais-X a son scrutinâts soledut par vê informazions su la composizion chimiche no dome superficial. Dai fotons di termoluminescence e dai fotons di catodiluminescence si àn, soledut, informazions su la presince di difiets e di tensions te strutture cristaline.

Naturalmentri ogni medaie e à il so ledrôs e ancje la SEM e à i siei limits.

Prin di dut il presit! Che nol è nome chel di acüst dal imprest ma ancje chel dal tignîlu in esercizi. Presits che a cressin (e a valop!) cul cressi dal numar e de cualitât dai rivelatôrs instalâts. Just par fâsi une idee dal impegn finanziari si pues dî che, in di di vuê, par cuistâ un microscopi di 30 kvolt (basse potence) cun dome il rivelatôr di eletrons secundaris a coventin 50.000 euros e plui di 3.000 euros par an di esercizi. Ma par un imprest di 100 kvolt (alte potence) cuntune serie complete di rivelatôrs no bastin 500.000 euros e 40.000 euros par an di esercizi. E cjalait che tai coscj di esercizi no son cjapâts dentri ni chei dal amortament dal imprest ni chei de paie di cui che lu ten in esercizi.

Po dopo, plui l'imprest al è complès (ven a stâi plui al è alt il numar di rivelatôrs instalâts) e plui a coventin cognossincis specialistichis par doprâlu ben e no gjavâ fûr dâts falâts.

E, par finî, par no vê fastilis (e no jessi obleâts a scrutinâ il campion cun tecnichis une vore particolârs, dispendiosis e intrigosis di rezi), al covente che il campion al vebi une buïne resistance ai efiets cubiâts dal

calôr e dal alt vueit e che la sô superficie e vebi un buine conducibilitât eletriche par sô nature (metai) o par pretratament artificiâl (ceramichis, plastichis e materiâi biologjics).

Rivant ae sience dai materiâi si scugne dî che intai ultins cincuant agns, si ben che altris tecnicis di scandai a sedin intratant nassudis e disvilupadis, cence la SEM i ricercjadôrs a varessin podût cjatâ alc di veramenti gnûf e inovatîf tant che un vuarp tal cirî foncs. Ven a stâi che cence SEM no varessin ancjemò materiâi funzionai ni biomateriâi, ni, tant mancûl, nanomateriâi e, duncje, la nestre vite di ogni dì e sarès un grum diferente: nuie telefonin, nuie television digjitâl, nuie notebook, nuie centraline eletroniche te machine e vie indenant.

Par fâ une rassegna complete des aplicazions de SEM ae sience dai materiâi a coventaressin dozenis e dozenis di pagjinis e tante pazienze no dome di bande di cui che e à di fâle ma, soledut, di bande dai letôrs. Discors compagn si à di fâ pe bibliografie. Stant che jo pazienze no 'nd ai (e no 'nd ai mai vude), o limitarai cheste rassegna a cualchi esempli jenfri chei plui significants e a segnalâ nome cualchi libri che al judi il letôr a fâsi une idee mancûl slambrade dai limits e des potenzialitâts de SEM che e je pardabon un voli magjic par ducj i ricercjadôrs de sience dai materiâi.

**SEM e mecaniche de fracture.** Il studi de mecaniche de fracture al è un dai pivots de sience dai materiâi e la SEM, cu la sô profonditât de zone di fûc e cul so podê risolutîf enormi, e à dât un jutori di fonde tal so disvilup.

Dome la SEM e podeve permeti di viodi, intun materiâl rinfuarçât cun nanofibris, tant ben la ponte de crevadure (Figure 2) di rivâ a aciertâ (de mancjance di nanofressuris tor ator des nanofibris) che il mecanisim di arrest de fracture nol è chel di Cook-Gordon ma chel di

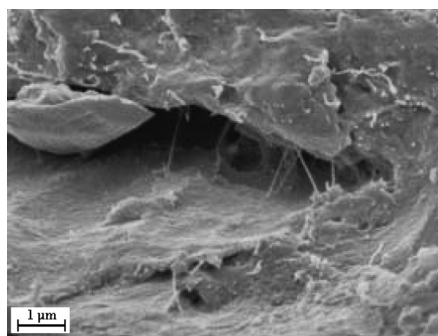


Figure 2. Ponte de crevadure intun nanocomposit. L'arest de crevadure par mecanisim di stirament elastic al ven dal fat che il rapuart *diametri de fibre / rai di curvadure de ponte de crevadure* al è masse piçul par permeti il disvilup dal mecanisim di arrest di Cook-Gordon.

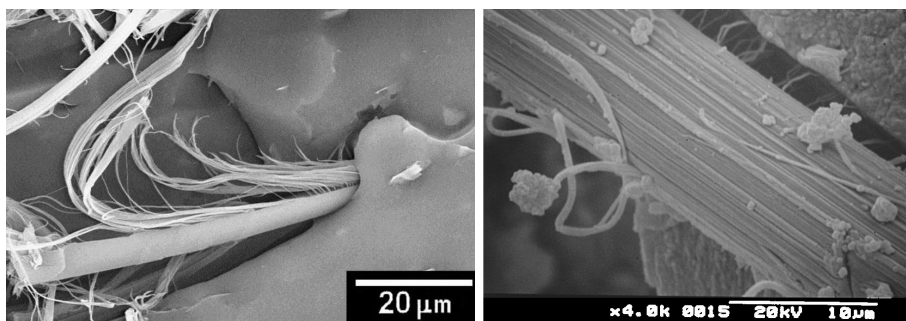


Figure 3. Superficie di frature di composites a matrîs plastice în resine epossidiche (çampe) o matrîs crevadice în paste di ciment (drete) rinforçâts cun fibrîs aramidichis.

stirament elastic (des nanofibris) e, duncje, di capî parcè che il model matematic dal mecanisim di Cook-Gordon, tant bon par calculâ *a priori* la resistance mecaniche de plui part dai materiâi composites, nol è bon par previodi chê dai nanocomposites.

E e je stade ancjemò la SEM a sclârî (Figure 3) parcè che i materiâi composites cun fibrîs aramidichis a àn resistencis mecanichis une vore plui grandis di chês previodudis par calcul. Cun di fat la resistance mecaniche di un materiâl, efietis di forme a part, si pues calculâlâ tignint cont de energjie consumade par disformâlu e fâ avanzâ la crevadure. In-tun composit, par solit, la energjie consumade par disformâ lis fibrîs e je tant piçule di podê lassâle di bande e tignî cont dome dal mecanisim di Cook-Gordon. Ma lis fibrîs aramidichis, sometudis a sfuarçs mecanics, prin di disformâsi o cedi a supin une vorone di energjie par slambrâsi in fibrilis (come che si viôt de figure 3) e duncje chê energjie e va zontade a chê altre dal mecanisim di Cook-Gordon par fâ un calcul *a priori* coret de resistance mecaniche di un composit cun fibrîs aramidichis.

Ma, plui in gjenerâl, ancje une semplice osservazion par SEM de superficie di frature di un materiâl e permet di gjavâ fûr un grum di informazions su la sô microstruture, sul so compuartament mecanic e, dispès, su la cause de sô rotture (Figuris 4 e 5).

**SEM e “memorie” dai materiâi.** Di cuant che la television e fâs cine cu la sience (soredut cu la medisine) nus tocje di sintî monadis di vê i sgrisui jù pal fil de schene.

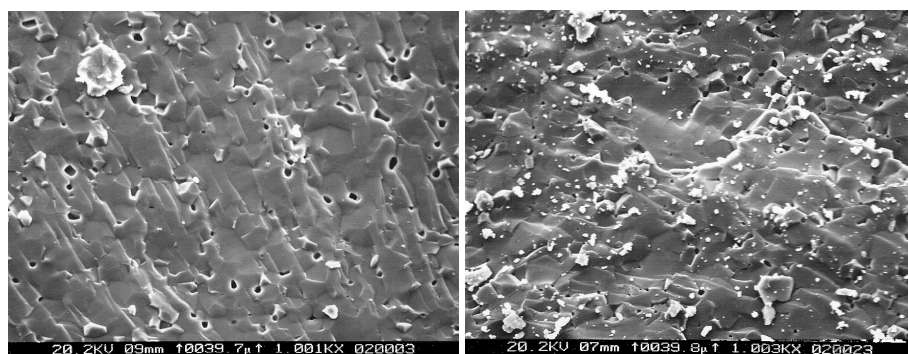


Figure 4. Superficiis di fracture di doi YIG ( $\text{Y}_3\text{Fe}_5\text{O}_{12}$  itri-fier-granât) doprâts par indreçâ lis ondis radar. La fracture transcrystalline par clivaç a scjalins paralêi dal YIG di çampe e indiche il comportament mecanic crevadiç dal prodot e e fâs capî che chel al ven fûr di un procès di union par tratament termic di diffusion al stât solit di pulvins sot alte pression monodirezionâl. La fracture dal YIG di drete si diferenzie di chê di çampe pal disordin dai scjalins di clivaç e pal bas numar e pes plui piçulis dimensions dai vueits infracrystallins che a pandin un procès sot pression plui alte e bidirezionâl o isostatiche.

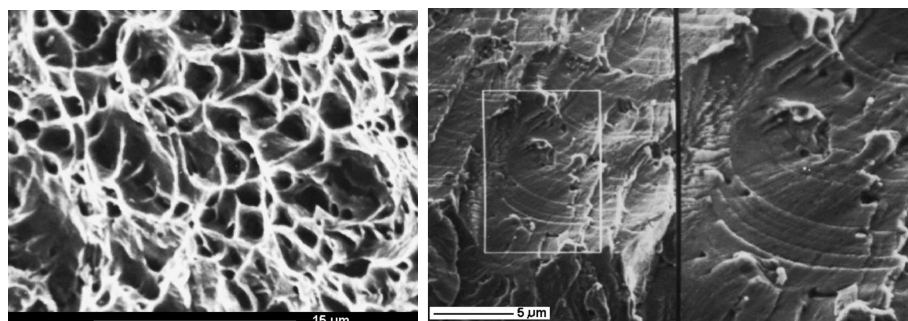


Figure 5. Superficiis di fracture di doi clauts di fier dolç compagns. Lis morfologiis des fraturis a son tipichis dai materiâi elastoplastics rots par semplice trazion, chel di çampe, e par disgnervament a fadie, chel di drete.

E pazienze se a dî monadis al è un vecjut che, supant il so toscan, ti conte ce che al à viodût par television. O savin che cui agns il sintiment e la memorie si sfantin. Ma se a sbarâ monadis a nastri al è il condutôr de transmission o, magari cussì no, l'*espert* intervistât, alore, pardabon, o vin di disperâsi. E, cun di fat, o soi za disperât!

A stâ ae television, par esempi. il “stent” (Figure 6) al sarès un “materiâl cun memorie di forme”.

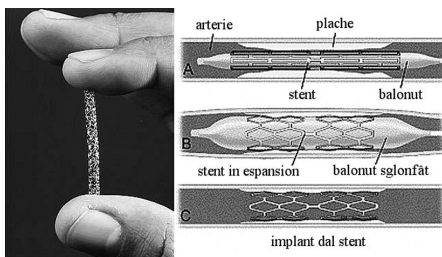


Figure 6. Stent: impress par distropâ, e tignî distropade, une arterie. Si trate di une struture a maiis, par solit metaliche, che si introdûs tal lumen de arterie e che, sgionfant un balonut, si fâs expandi a nivel de ostruzion di mût che il so diametri al sedi compagn di chel originari dal vâs.

di un materiâl no je nuie altri che l'efiet macroscopic de sô elasticitât: duncje, in realtât, nuie a ce viodi cu la *memorie* dai materiâi! Cun buine pâs dai condutôrs des transmissions televisivis di “divulgazione scientifica” (!) e dai lôr *experts* (!).

La *memorie* che si fevele in sience dai materiâi e je altre robe. Si trate di ducj chei jenfrisejns che a marchin la microstruture di un materiâl e che, a savê cjatâju fûr e leiju, nus contin in struc la sô storie, il so passât.

Par podê cjatâ chescj jenfrisejns no si pues fâ di mancûl di un bon microscopi a scansion eletroniche; miôr se, in plui dal rivelatôr di eletrons secundaris, a son instalâts ancje chei di fotons-X e di termoluminescence. Miôr ancjemò se ducj i rivelatôrs a son instalâts parcè che, plui segnâi diviers si cjolin sù, e plui jenfrisejns diviers si puedin cjatâ.

Dut câs, ancje cuntune semplice osservazion par mieç di eletrons secundaris, dispès (ma no simpri) si puedin cjatâ jenfrisejns impuartants come che e mostre ancje la figure 4.

Par esempi: de morfologjie dai vueits infracristalins de figure 4 si è gjavât fûr che i doi YIG a son stâts prontâts par difusion al stât solit di pulvins cun tratament termic sot alte pression; mentri al è l'orientament dai scjalins di clivaç (paralêl te foto di çampe e casual ta chêt di drete) che al sburte a dî che la pression tal câs dal YIG di çampe e jere stade monodirezionâl là che pal YIG di drete e jere stade o isostatiche o, almancul, bidirezionâl. E, par finî, e je stade la riduzion des dimensions e dal numar dai vueits cence un aument contemporani des dimensions dai cri-

No, sacrabolt! Prin di dut un stent nol è un materiâl ma un impress, une struture fate cuntun materiâl! Ma, soledut, i materiâi che si doprin in di di vuê par fâ stents a son sienzûts jenfri chei che no àn memorie di forme. Al è fondamentâl che no le vebin, se di no, poc timp dopo vè gjavât il balonut, il stent al sarès bielzà tornât al diametri originari e la arterie e sarès da cjâf stropade! E, par finî, ricuardin che la “memorie di forme”

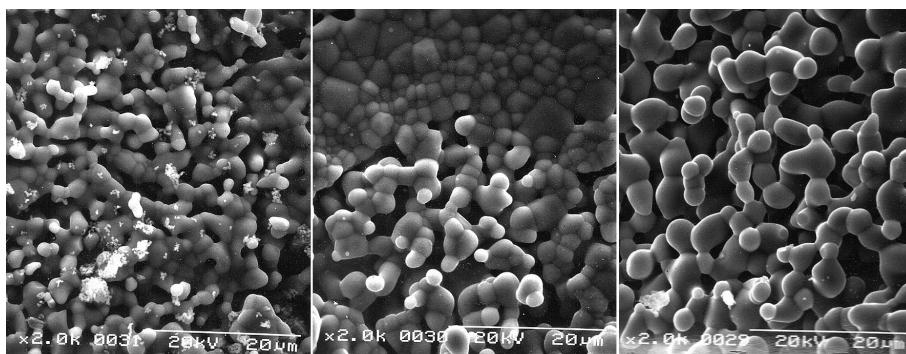


Figure 7. Superficiis di plachetis di trê YIG sinterizâts, diferents pai pulvins di partence ma compagns par procès di sinterizazion. YIG di çampe, pulvin otignût dai clorûrs di itri e fier par procès *sol-gel*. YIG di centri, pulvin otignût dai nitrâts di itri e fier par coprecipitazion e cjalcazion. YIG di drete, pulvin otignût par difusion al stât solit di une mixture di ossits di itri e fier e seguitive masanadure.

stai a pandi che la pression di procès pal YIG di drete e jere stade plui alte di chê pal YIG di çampe. Di fat, se a ridusi la porosità al fos stât il slungjament dal timp di tratament termic si varès cjatade une slavradure significative tes dimensions dai cristai.

Naturalmentri, se par cualsisei reson no si à il dirit di pretratâ, o scusâ, o taçâ, il materiâl, la analisi par SEM, cence il jutori di altri rivelatôrs in plui di chel pai eletrons secundaris (SE), no puarte tant lontan come che e pant la figure 7.

Dal scrutini des fotos de figure 7 al salte fûr, cun sigurece, nome che ducj i YIG a son stâts produsûts par sinterizazion di pulvins in assente di alte pression. E ançe cul jutori de microsonde EDAX (rivelatôr par dispersion de energjie dai fotons X) no si rive (Figure 8) a cognossi tant di plui: nome il fat che un dai trê YIG al è stât otignût par sinterizazion di un pulvin che nol à composizion chimiche omogjenie nancje tai singui

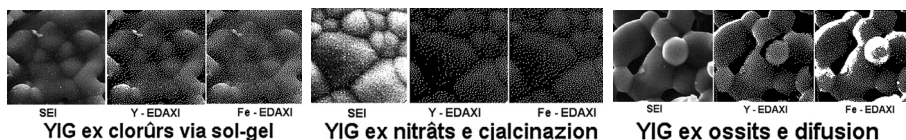


Figure 8. I trê YIG de figure 7: mapis dai eletrons secundaris (SE) e dai fotons-X (EDAX) dal itri (Y) e dal fier (Fe) metûts a confront.

cristai e duncje che il pulvin di partence al veve une origine diferente di chei altris.

In sumis, la SEM e pues permeti di cognossi la storie di une robe solide ma no simpri si rive cence spindi une fortune e cence taçâ la robe.

**SEM e chimichefisiche dai materiâi.** La chimichefisiche cui siei modei matematics e je un altri pivot de sience dai materiâi, permetint di fâ des prevision sui procès di produzion e su lis interazioni cul ambient di vore dai materiâi. E la SEM, aben che no sedi une des armis di fonde par studiâ i aspiets chimicfisics dai materiâi, e pues dâ une man impuartantone: soledut tal capî lis causis des diferencis jenfri lis previsioni teorichis e la realtât.

Par no stâ a menâle lungje o puartarai nome un esempi; par altri gjavât fûr di un câs che, par vie des ricjadudis industriâls, al à intrigât par plui di 40 agns (!) i ricercjadôrs dal setôr.

Il model de cinetiche chimiche de idratazion, a 10°C, dal  $\text{CaAl}_2\text{O}_4$  (fase principâl dal ciment aluminôs une vore doprât pes costruzioni tai paîs polârs) in presince, sicu agregât, di calcâr ( $\text{CaCO}_3$ ) al previôt un timp di induzion de formazion de fase idrate ( $\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ) tant plui lunc di chel che si cjate te realtât. Parcè? La rispueste si le gjave fûr de figure 9.

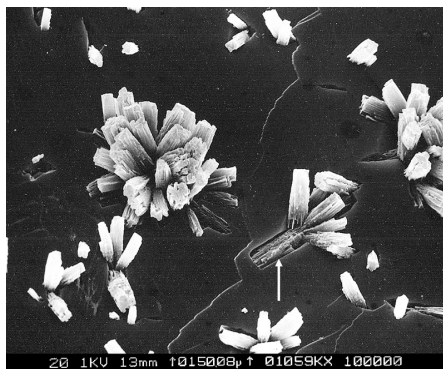


Figure 9. Cristai di  $\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  che a saltin fûr dai difiets presints su la superficie dal  $\text{CaCO}_3$ . La nassite e il disvilup de plui part dai cristai di idrât de foto si devin al *efiet dal volum confinât*. Ma tal câs dal cristal segnât cu la frece a chel efiet si some chel de nucleazion eterogjenie epitassiche.

Il model cinetic dal sisteme  $\text{CaAl}_2\text{O}_4 - \text{CaCO}_3 - \text{H}_2\text{O}$ , al è bielzà avonde complès par rivâ a previodi la pussibilitât di une nucleazion eterogjenie de fase idrate, ma no tant di podê rivâ ancje a tignî in cont il fat che diviers plans cristalins dal  $\text{CaCO}_3$  a àn densitât atomiche avuâl a chê dai plans esagonâls dai cristai di  $\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$ ; duncje, nol rive a previodi la pussibilitât di une nucleazion eterogjenie epitassiche dal  $\text{CaAl}_2\text{O}_4 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$  sul  $\text{CaCO}_3$  e de seguitive inressite epitassiâl dai cristai di idrât. Ma la nucleazion eterogjenie epitassiche

di une fase e consume mancul energjie par procedi de nucleazion eterogjenie semplice e partant il disvilup dai cristai al risulte anticipât. Parimentri il model cinetic nol rive a tignî cont dal *efiet dal volum confinât* tal anticipâ la saturazion de soluzion che e jemple chel volum; duncje nol pues previodi la pussibilitât di nucleazion eterogjenie semplice e disvilup anticipât di cristai di fase idrate tai volums confinâts de superficie dal calcâr.

**SEM e materiâi di interès forens.** Nol covente jessi divoradôrs di croniche nere par cognossi la impuartance, pal disvilup des investigazions, des analisis fatis su lis robis cjatadis te sene dal delit. Duncje no covente jessi une acule par capî la impuartance de SEM tes indagjins judiziariis e par nasâ che la casistiche des aplicazions e je scuasit disconfinade. Un grant archivi di dôts dal sigûr al jude, ma no simpri al baste. Cualchi volte, nâs, fortune e une buine esperience dal setôr dal materiâl scrutinât a puedin dâ il jutori risolutîf, come che al mostre il câs de strutture sdrumade cence cause evidente che us contarei par fâ un ultin esempi di aplicazion de SEM e par rivâ insom a cheste rassegne.

Agnorums indaûr intun grant cantîr edil dongje l'aeropuart di Turin Caselle, vie pal unvier, juste sul finî di un turni di vore e jere dibot colade une piçule part de strutture in costruzion; un pâr di ferîts ma nissun muart. E interven la magjistrature, a scomencin lis ricercjis e ancje il RIS dai carabinieri si da da fâ: ma no si rive a nuie. Proget, calcuî statics e mix-design dal beton juscj e daûr normative. Capitolâts di compre dai materiâi coerents al proget e boletis di consegne che a rispuindin ai capitolâts. Cualitât dai materiâi (controlade dal RIS) daûr capitolâts. Metude in vore (almancul a stâ al *libri di cantîr*) daûr normative. Insome nuie fûr di scure... ma une part de strutture e jere colade l'istès.

Vierte finide, prin di rindisi, il GIP (che mi cognosseve) mi veve consultât di amî.

Te relazion dal RIS o vevi cjatât une note che no mi tornave: “tal *fin* dal beton dai pilastris sdrumâts si cjate ancje polvar vulcanic”.

Polvar vulcanic a Caselle?!

Mi jere vignût un sospiet e o vevi fât l'erôr di contâlu al GIP che mi veve sfulminât cu la nomine a CTU (consulent tecnic di ufizi). O vevi duncje scugnût dâmi da fâ. Ma par fortune o vevi viodût just e intun pâr

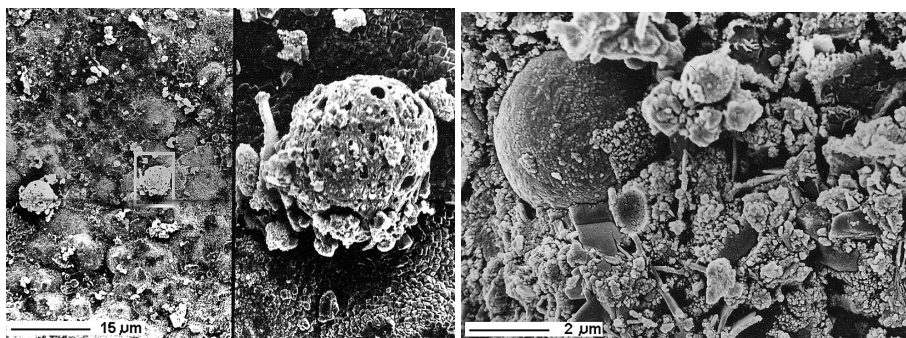


Figure 10. Superficie di frature fresche di un repert giudiziari: beton gjavât fûr di un pilastri sfracaiât di une strutture dome in part sdrumade. I gragnei taronts plui o mancun sbusâts no son di origin vulcaniche, ma metalurgjiche (scurie temperade di alt-for) e a vegnin dal ciment di misture doprât par fâ il beton. La morfologjie e lis dimensions des fasis idratis (foto a drete) a provin che il procès di idratazion al è restât blocât pôc timp dopo jessi scomençât.

di oris la conferme “materiâl” a buine part dal gno sospiet e jere sot il voli (Figuris 10 e 11).

Ce che al RIS a vevin classificât tant che “polvar vulcanic” al jere in realtât scurie temperade di alt-for e no vignive dal fin dal agregât ma dal ciment che, in dute evidence, nol jere ciment *portland* (sicu ordenât tal capitolât di compre e tant che declarât de centrâl di betonaç tes boletis di consegne) ma ciment *di alt-for*. Erôrs veniâi (chei dal RIS) dovûts nome a la mancance di une largje experience tal cjamp dai ciments di misture, ma che, pûr pûr, a vevin impantanât la indagjin. Mancance di

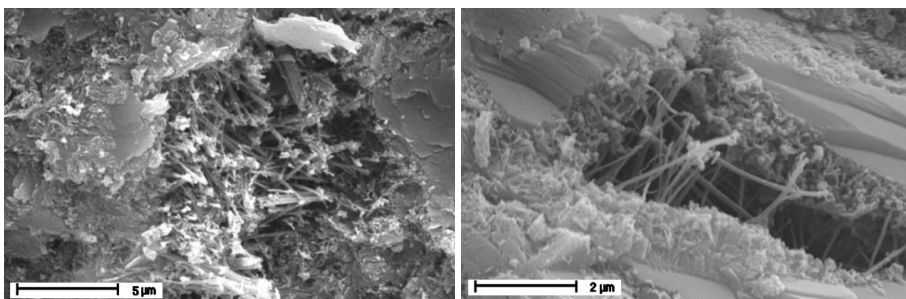


Figure 11. Superficie di frature fresche di un repert giudiziari: beton gjavât fûr di un pilastri intat de stesse strutture di Figure 10, ma part no sdrumade. Morfologjie e dimensions des fasis idratis a son compatibilis cun chês di un beton madurît normalmentri par almanco une setemane.

esperience confermade dal fat di no jessisi visâts (o di no vê tignût just cont) des diferencis di morfologjie jenfri il beton gjavât fûr di un pilastri de part di strutture che no jere colade (Figure 11) e chel cjolt sù di un pilastri sfracaiât a tiere (Figure 10 a drete).

A mancjavin dome pluî confermis mineralogjichis, cronologjichis e meteorologjichis. La analisi mineralogjiche dai repert mi confermà che il ciment dal beton dal pilastri sfracaiât al jere un ciment di misture (cun tenôr di scurie temperade di alt-for pluitost alt) dulà che chel dal beton dal pilastri no colât al jere un ciment portland sclet.

Confrontant libri di cantîr e boletis di consegne dai betons al jere stât facil stabilî che il beton doprât par fâ sù i pilastris colâts al jere rivât in cantîr ae 16.30 (praticamentri a gnot) dai 30 di Dicembar e invezit chel dai pilastris no sdrumâts al jere rivât in cantîr tes matinis dai 22, 23, 28 e 29 di Dicembar. E scrusignant i regjistris dal Centri Meteorologjic de Aeronautiche Militâr di Caselle si confermà che jenfri i 10 e i 30 di Dicembar il timp si jere mantignût umit (fumate o cîl cuviert) e la temperadure parsore 0°C. Po, te gnot dai 30 di Dicembar, a netâ cîl e tiere e jere rivade la tramontane e la temperadure e jere dibot colade a -10°C. Daspò la tramontane no veve molât par dôs setemanis e la temperadure e veve vongolât tor dai -4°C.

Aromai il cuadri al jere complet e si podeve butâ jù la relazion pal GIP.

La cause prime de sdrumade di part de strutture e jere di sigûr dal ciment di misture dal beton doprât par tirâ sù i pilastris colâts. Il ciment di alt-for al è un otim ciment ma no si à di doprâlu in climis frêts par vie dal fat che al è pluî lunc (dal ciment potland sclet) tal idratâsi e, duncje, tal deliberâ il calôr di idratazion. Premure, pocje serietât des maestrançis de centrâl di betonaç e dal cantîr e stagion frede a vevin fat il rest.

Par fal o par distrazion pe premure di tornâ a cjase, in centrâl di betonaç tal fâ il beton, ai 30 di Dicembar, tal puest dal portland a vevin doprât il ciment di alt-for. In cantîr, di sigûr par premure, a vevin metût in vore il beton e a jerin lâts vie di buride cence curâsi di dâ protezion termiche al gjet. La seguitive colade de temperadure, no avonde compensade dal calôr de idratazion (che e jere a pene inviade), al à glaçât dut blocant la idratazion. Cuant che, ai 3 di Zenâr, a vevin gjavâts i taponaments dai pilastris par predisponi chei pe gjetade des soletis, in cantîr (a dispiet de normative) dinissun si jere dât dongje par testâ cul sclerome-

tri ducj i pilastris e duncje no si jerin visâts che a tignî sù chei fats sù par ultins nol jere il ciment indurît ma la glace. Ai 7 di Zenâr chei pilastris, aromai dal dut suiâts pes sborfinadis de gaiarde tramontane, a jerin colâts sot de cjame des soletis.

**Conclusions.** Cundut che la rassegna e je une vore incomplete, i esemplis puartâts a pandin che la SEM e je, aromai, une arme di ricercje che no si po fâ di mancûl par studiâ i materiâi, jessint buine di distrigâ berdeis ancje dulà che altris tecnicis no rivin. Pecjât che in Italie, pai siei alts coscj, e sedi une vore mancûl doprade di ce che e varès di jessi!

## Bibliografie

- Shimizu K, Mitani T. (2010). *New Horizons of Applied Scanning Electron Microscopy*. Berlin - Heidelberg: Springer Verlag.
- Raj B., Bhanu Sankara Rao K. (2005). *Frontiers in Materials Science*. Bangalore: Universities Press.
- Goodhew P. J., Humphreys F. J., Beanland R. (2001). *Electron microscopy and analysis*. London - N.Y.: Taylor & Francis.
- Watt I. M. (1997). *The principles and practice of electron microscopy*. Cambridge – New York - Melbourne: Cambridge University Press.
- Wetzig K., Schulze D. (1995). *In situ scanning electron microscopy in materials research*. Berlin: Akademie Verlag.